

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г.В.КАРПЕНКА

На правах рукопису

СТУХЛЯК Петро Данилович

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ
КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТЬ НА
ОСНОВІ РЕАКТОПЛАСТІВ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ
І МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

05. 02. 01 - Матеріалознавство в машинобудуванні

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів - 1996

Дисертацією є рукопис

АВ 34.902

Робота виконана в Тернопільському приладобудівному
ім. І. Пулюя

Офіційні опоненти : академік НАН України,
доктор технічних наук, професор
Кислий П.С.

доктор технічних наук, професор
Голубець В.М.

доктор хімічних наук, професор
Суберляк О.В.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00754624 (S)

Провідна організація - Інститут проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

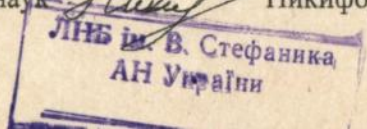
Захист відбудеться “ 26 ” червня 1996 р. о 14⁰⁰ год. на
засіданні спеціалізованої ради Д 04.01.03. при Фізико-механічному
інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України (290601, м. Львів, МСП,
вул. Наукова, 5).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-механічного
інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (290601, м. Львів, МСП,
вул. Наукова, 5)

Автореферат розісланий “ 22 ” червня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради,
доктор технічних наук

Г. М. Никифорчин Никифорчин Г.М.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Однією з тенденцій розвитку сучасного матеріалознавства в машинобудуванні є створення композитних матеріалів (КМ), у тому числі й на основі реактопластів, що модифіковані та наповнені термопластами, дисперсіями мінеральних добавок та волокном. Визначну роль у забезпеченні покращення комплексу експлуатаційних характеристик композитів триботехнічного та електротеплофізичного призначення відіграє структура матеріалу, головними параметрами якої є ступінь хімічного зшивання та фізична взаємодія компонентів на межі поділу фаз у гетерогенній системі. Незважаючи на певні успіхи у вивченні впливу різного типу модифікаторів та наповнювачів на структуру КМ на основі реактопластів, залишаються ще не з'ясованими принципові питання взаємодії з такою матрицею термопластів як пластифікованими, так і у вигляді розчинів та фізичної взаємодії макромолекул основи з активними центрами на поверхні наповнювача. Аналіз результатів досліджень кінетики взаємодії інгредієнтів на межі поділу "реактопласт-наповнювач" показує, що одним з ефективних шляхів цілеспрямованого створення КМ із заданими властивостями в умовах промислових технологій є науково обгрунтоване введення структурно-активних модифікаторів та наповнювачів. Актуальним є також створення багат шарових композитних покриттів, шари яких мають міцну адгезію до металевої основи, зносостійкі, теплопровідні, електро- та теплоізолюючі.

Мета роботи. Виявлення закономірностей та механізму зміни фазово-структурного стану реактопластів при введенні модифікаторів та наповнювачів і створення на їх основі композитних матеріалів з керованими триботехнічними, фізико-механічними, електрофізичними властивостями для вузлів тертя та металоконструкцій.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Дослідити вплив параметрів топологічної структури та фізичної взаємодії інгредієнтів у КМ на їх фізико-механічні, фрикційні, електро- та теплофізичні властивості при введенні структурно-активних модифікаторів та наповнювачів. Визначити шляхи підвищення експлуатаційних характеристик термореактивних в'язучих та композитів на їх основі.

2. Встановити вплив органічних і мінеральних наповнювачів та методів активації поверхні на механізми армування, зношування, зміни електро- та теплофізичних властивостей композитів, щоб спрямовано регулювати їх експлуатаційні характеристики.

3. Дослідити вплив структури реактопластів на внутрішні напруження та адгезійну міцність при введенні різних за активністю до полімерної матриці органічних та мінеральних наповнювачів, у тому числі й в умовах термічного циклювання при криогенних температурах.

4. Підвищити експлуатаційні характеристики вузлів за рахунок використання спеціальних машинобудівних КМ та створити на їх основі комплексні багат шарові покриття різного функційного призначення. Розробити нові вузли тертя та обладнання для нанесення композитних покриттів на поверхні складного профілю і здійснити їх дослідно-промислово перевірку.

Наукова новизна. Досліджено процес формування топологічної структури епоксидних і епоксифуранових в'язучих при модифікуванні полівініловим спиртом (ПВС), полівінілхлоридом (ПВХ) з наступною термічною обробкою (350-520К). Вперше встановлено, що введення у в'язуче ПВС і ПВХ створює взаємопроникні системи з сіткового і лінійного полімерів. Керуючи параметрами структури системи, що створюється, природою і концентрацією модифікаторів, температурно-часовим режимом обробки, можливо регулювати триботехнічні та фізико-механічні характеристики композитного матеріалу. Варіювання структурних параметрів епоксидних і епоксифуранових в'язучих дозволяє підвищити їх зносостійкість у 6-8 разів, а навантажувальну здатність у 1,5-2 рази. Експериментально встановлено, що опір фрикційно-контактній втомі модифікованих епоксидних і епоксифуранових композитів корелює з величиною молекулярної маси ділянки ланцюга між вузлами сітки в'язучого. Виявлена залежність дає можливість прогнозувати їх поведінку під час фрикційної взаємодії.

Вперше вивчено вплив мінеральних наповнювачів з різною поверхневою енергією на міцнісні властивості композитів. Показано, що поліпшення фізико-механічних та антифрикційних характеристик пов'язано зі збільшенням ступеня зшивання внаслідок утворення додаткових фізичних вузлів між в'язучим і наповнювачем, зміцнююча дія яких підвищується з ростом поверхневої енергії.

На основі результатів досліджень фізичної, фізико-хімічної та хемосорбційної взаємодії між наповнювачем та в'язучим встановлено механізм і закономірності підвищення електротехнічних та теплофізичних характеристик за рахунок формування на межі фаз зон з новими властивостями. Константовано, що введення аеросилу, γ -амінопропілаеросилу, Cr_2O_3 , Al_2O_3 покращує діелектричні показники у 3-6 разів, електротехнічні - у 2-3 рази, теплофізичні - у 2-4 рази. Розроблені композити

стійкі до впливу атмосферного середовища і γ -опромінення. Досягнуто додаткового підвищення фізико-механічних та електротехнічних характеристик композитів попередньою обробкою поверхнево-активними речовинами та диспергуванням при криогенних температурах. Запропоновано метод вивчення структури і прогнозування електротехнічних властивостей КМ за допомогою лазерного ударного впливу.

Практична цінність. На підставі експериментальних даних створено зносостійкі машинобудівні матеріали з підвищеними фізико-механічними, триботехнічними, електротехнічними та теплофізичними характеристиками порівняно із зарубіжними матеріалами (США, Японія) аналогічного призначення. Опрацьовано методи керування структурними, адгезійними, фрикційними та електротеплофізичними характеристиками композитних матеріалів шляхом введення у в'язуче комплексних модифікаторів, вміст яких оптимізовано математичним моделюванням. Сконструйовано пристрої для нанесення композитів на довгомірні поверхні, внутрішні циліндричні поверхні складного профілю вузлів тертя та систем електрообігріву оболонкових конструкцій. Встановлено оптимальні навантажувально-швидкісні режими роботи КМ в широкому діапазоні температур (300-460 К). Запропоновані машинобудівні матеріали та вузли тертя пройшли дослідно-промислово перевірку на підприємствах України. Економічний ефект від впровадження результатів роботи у цінах до 1990 року становить 1млн. 158 тис. крб.

На захист виносяться такі основні положення.

1. Експериментально встановлені закономірності впливу топологічної структури та ступеня фізичного зшивання на фізико-механічні й триботехнічні характеристики модифікованих термопластичними полімерами реактопластів.

2. Методи направленої регулювання параметрів структури шляхом обґрунтованого введення модифікаторів та наповнювачів органічного чи мінерального походження різної концентрації, що у комплексі з термічною обробкою дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики композитів.

3. Методи поліпшення електро- та теплофізичних властивостей КМ направленим регулюванням структури в матеріалі через створення міжфазних зон з новими характеристиками за рахунок хімічної, фізичної та хемосорбційної взаємодії дисперсій оксидів різної природи.

4. Розроблені КМ для вузлів тертя з підвищеною здатністю до прояву "стоп-ефекту" в умовах реверсивного руху, матеріали та ба-

гатошарові покриття з підвищеними електротехнічними характеристиками для роботи в несприятливих кліматичних умовах.

5. Методи активації поверхні мінеральних дисперсій і комплекс методик вивчення структурних властивостей та механізму їх впливу на електротехнічні характеристики КМ.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 112 робіт, у тому числі 1 монографія та 53 авторські свідоцтва.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, основних висновків, літератури й додатку, викладена на 382 сторінках машинописного тексту, містить 114 рисунків, 21 таблицю та бібліографічний список 350 джерел.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показано сучасний технічний рівень досягнень у створенні й дослідженні нових композиційних матеріалів і покриттів на основі реактопластів у вузлах різного функційного призначення. Обґрунтовано актуальність теми, викладено головні положення, анотовано результати роботи.

Перший розділ присвячений огляду літератури та обґрунтуванню напрямку досліджень. Систематизовано дані про вплив структури і ступеня її зшивання на процеси зношування, теплопереносу та електричні властивості сіткових полімерів. Проаналізовано досвід використання композитних матеріалів і покриттів на основі реактопластів у вузлах тертя та системах електротехнічного призначення. Описано вплив наповнювачів антифрикційного призначення на зносостійкість, електричну міцність, діелектричні характеристики та теплопровідність композитів на основі реактопластів. На підставі проведеного аналізу сформульовано першочергові завдання дослідження.

Другий розділ містить опис експериментальних методик. Виходячи з поставлених завдань досліджено епоксидні, епоксифуранові та фенолформальдегідні смоли, які випускають багатотонажно й широко використовують у промисловості. Встановлено, що оптимальне поєднання триботехнічних, фізико-механічних та адгезійних властивостей має епоксифуранова смола, що містить 75 мас.ч. фурфуролацетонowego мономера на 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20. Як органічні наповнювачі використовували порошки поліетилену, поліаміду-6, ПВС, ПВХ і політетрафторитилену (ПТФЕ) дисперсністю 50-100 мкм, а також їх розчини. Мінеральними наповнювачами були оксиди металів Al_2O_3 , ZnO , Cr_2O_3 , каолін з дисперсністю 5, 10, 30, 100 мкм, аеросил марки А-175 і γ -амінопропілаеросил дисперсністю до 5 мкм, сплав ПТ-

НА-01 (ТУ 48-1206-156-82) дисперсністю до 63 мкм. Антифрикційними наповнювачами і функційними добавками слугували графіт, дисульфід молібдену, кобальтонітрат натрію, бензойнокислий диметиламоній.

Адгезійну міцність покрить оцінювали при нормальному відриві зосередженою силою (машини ЦД-4 і ЦМ-10) за умов постійної швидкості навантаження - 500 Н/с (метод грибків) та відшаровування фольги від КМ. За відповідними ДЕСТами досліджували механічні характеристики покрить, зокрема мікротвердість (прилад ПМТ-3 та "Neophot") і внутрішні напруження в них (консольний метод).

Модуль пружності при температурі нижче і вище температури склування полімеру визначали за переміщенням індентора при різних питомих навантаженнях, використовуючи розв'язок контактної задачі для впровадження круглого в плані штампа в пружний прошарок, що лежить на жорсткій основі.

Фрикційні характеристики досліджували на машині МІ-1М і при реверсивному русі однієї з поверхонь тертя на пристроях та по методиках, що розроблені в ІММС АН Біларусі. Вивчено роль температури, яка розвивається в поверхневому шарі під фрикційним навантаженням зразка, у зменшенні його маси. Це дозволило збільшити точність визначення інтенсивності вагового зношування зразків. Використовували спеціальний прилад по (а.с.№1166838).

Структурні параметри полімерів і композитів на їх основі досліджували методами сканівної електронної мікроскопії (JSM-50A), диференціально-термічного аналізу (ДТА) на дериватографі Q-1500, термомеханічного (ТМА) аналізу (аналізатор "Термофлекс"), електронного парамагнітного резонансу (РЕ-1306), частотної релаксометрії та ІЧ-спектроскопії (UR-20). Тангенс кута діелектричних втрат матеріалів визначали на частотах 0,1, 1, 10 кГц (ДЕСТ 6433.4-71), електричну міцність та теплопровідність - згідно ДЕСТ 6433.3-71 і ТУ 25-11.1487-79. Зразки отримували методом вільної заливки та газотермічним напиленням епоксидних матеріалів марок УП-3115, П-ЕП-91, П-ЕП-134, П-ЕП-185, П-ЕП-177.

Результати експериментальних випробувань, оброблені методами математичної статистики та статистичними методами планування експериментів, представлені у вигляді таблиць, графіків і рівнянь регресії. Мінімальні концентрації інгредієнтів в матеріалах на основі епоксидних смол і технологічні режими їх формування встановлювали по математичним моделюванням за допомогою ЕОМ.

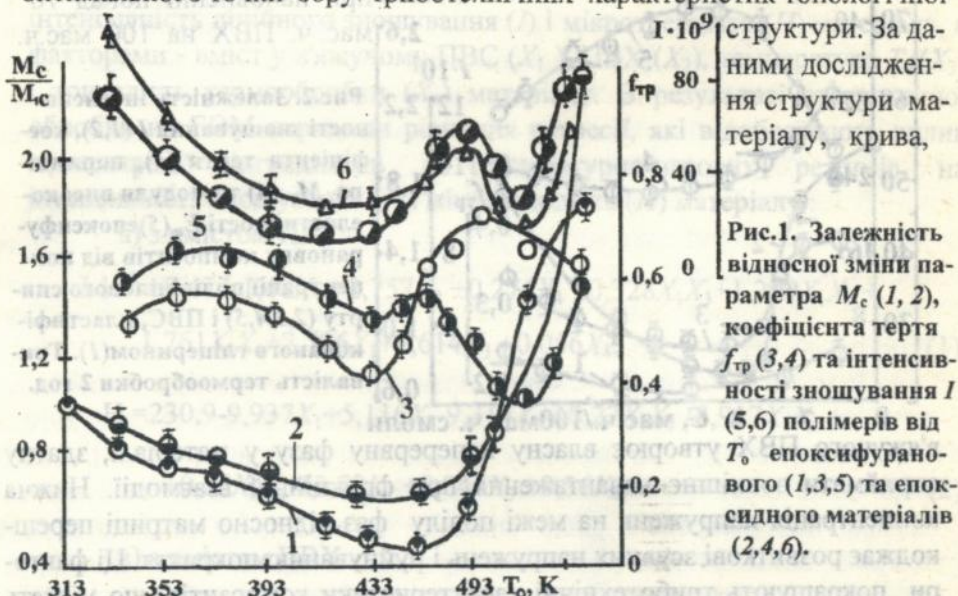
У третьому розділі наведено результати досліджень впливу природи термопластичних полімерних домішок і температурно-часових умов

твердження на формування топологічної структури, триботехнічні і фізико-механічні властивості епоксидних композитів. Виявили, що залежності інтенсивності лінійного зношування немодифікованого і модифікованого фурфуролацетоновим мономером (ФА) епоксидного полімеру від температури обробки (T_0) мають два мінімуми в області температур $T_0 = 380-450$ К і $T_0 = 490-500$ К (рис.1). Методом термомеханічного аналізу показано, що перший мінімум на кривій зношування спричинений збільшенням ступеня зшивання у КМ (рис.1). Топологічна структура полімерної матриці, сформована в діапазоні $T_0 = 380-450$ К, характеризується мінімальною масою ділянки ланцюга між вузлами сітки (M_c) і підвищеною стійкістю до фрикційно-контактної втоми. Це призводить до зниження контактних деформацій та інтенсивності лінійного зношування реактопласту, що обумовлено покращенням його фізико-механічних властивостей. Введення ФА в епоксидний олігомер формує в об'ємі в'язучого топологічну структуру з більш низьким значенням параметра M_c порівняно з немодифікованим в'язучим. Це сприяє подальшому зниженню контактних деформацій та інтенсивності зношування модифікованого полімеру. Таким чином, зміною топологічної структури базового в'язучого створено передумови для підвищення зносостійкості композита.

Деяке збільшення зносостійкості спостерігається й при $T_0 = 490-500$ К. Методами ДТА, ТМА і ІЧ-спектроскопії встановлено, що це пов'язано з накопиченням у полімері при таких температурах термічної обробки, продуктів термоокислювальної деструкції макромолекул і низькомолекулярних речовин. Зокрема, за допомогою ІЧ-спектроскопії виявлено збільшення в матеріалі кількості ОН і С=С груп. Про розрив зв'язків основних ланцюгів макромолекул в'язучого свідчить також збільшення M_c при $T_0 = 490-500$ К. Дані продукти виконують роль пластифікатора та твердих мастил, підвищуючи зносостійкість епоксидних полімерів.

Ненаповнені в'язучі мають високий коефіцієнт тертя і схильні до прояву "стоп-ефекту" (підвищення коефіцієнта тертя на початку роботи пари тертя після витримки протягом певного часу під навантаженням), що заваджає їх широкому використанню як антифрикційних покриттів. У зв'язку з цим досліджено вплив розчинів, дисперсій термопластів та їх пластифікації на структуру, триботехнічні і фізико-механічні характеристики епоксидних полімерів. Вибір наповнювачів продиктований, з одного боку, різними їх фізико-механічними властивостями, а з другого - неоднозначним впливом на кінетику формування і характер топологічних структур. Встановлено, що матеріали залежно від вмісту в

них термопластичного наповнювача мають мінімальну інтенсивність зношування при наявності у в'язучому 3-5 мас.ч. ПВС і 60-80 мас.ч. ПВХ. У разі ПВС це зумовлено впливом модифікатора на формування оптимальної з точки зору триботехнічних характеристик топологічної



котра апроксимує залежність M_c від ступеня наповнення ПВС, має мінімум у тих самих областях, що й крива залежності інтенсивності зношування (рис.2). Термомеханічним аналізом, частотною релаксометрією та електронною растровою мікроскопією встановлено, що збільшення ступеня зшивання при введенні 3-5 мас.ч. ПВС на 100 мас.ч. в'язучого пов'язане з утворенням взаємопроникних полімерних сіток і підвищує опір зношуванню в 6-8 разів.

Невелика кількість ПВХ у в'язучому призводить до зниження зносостійкості матеріалу, подальше збільшення його вмісту в матриці супроводжується монотонним зростанням M_c , що позначається на фізико-механічних властивостях композита. Так, у діапазоні 10-100 мас.ч. ПВХ на 100 мас.ч. в'язучого модуль пружності (E) зменшується у 4 рази, а мікротвердість (H) - у 3 рази. Введення ж значної кількості наповнювача (біля 30 мас.ч. на 100 мас.ч. в'язучого) послаблює опір зношуванню матеріалу. Оскільки ПВХ є полімером, що погано суміщується із в'язучим, то при твердінні матриці це спричиняє підвищену гетерогенність композита і появу дефектів на границі фаз. Внаслідок цього

під час фрикційної взаємодії інтенсифікується утворення мікротріщин, що знижує зносостійкість покриття. Методом електронної растрової мі-

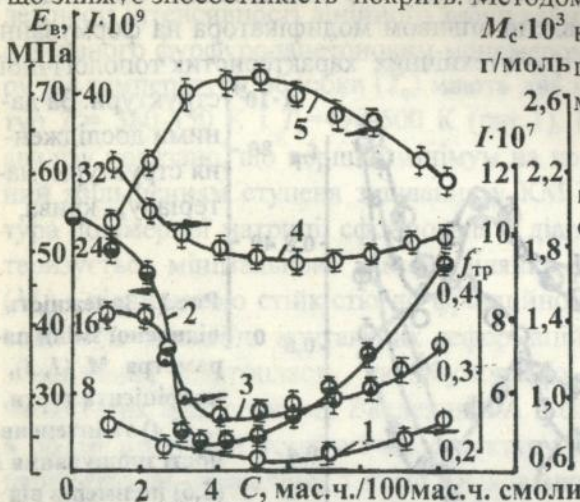


Рис.2. Залежність інтенсивності зношування I (1,2), коефіцієнта тертя (3), параметра M_c (4) та модуля високоеластичності E_v (5) епоксифуранових композитів від концентрації полівінілового спирту (2,3,4,5) і ПВС, пластифікованого гліцерином (1). Тривалість термообробки 2 год.

в'язучого ПВХ утворює власну неперервну фазу у матеріалі, здатну сприймати зовнішнє навантаження при фрикційній взаємодії. Нижча концентрація напружень на межі поділу фаз відносно матриці перешкоджає розвитку зсувних напружень і руйнуванню покриття. Ці фактори покращують триботехнічні характеристики композитів, що містять ПВХ. Суттєво понижують інтенсивність зношування також плівки, сформовані на поверхні контртіла в процесі тертя, що забезпечує мале зусилля зсуву та високу швидкість релаксації контактних напружень. Крива температурної залежності триботехнічних характеристик матеріалів, модифікованих ПВС і ПВХ, має мінімум при $T_0=380-450$ К, тобто в тих же областях, що й чистого в'язучого. У цьому випадку домінуючий вплив на структуру полімерної матриці вносять процеси, що відбуваються у в'язучому. Наявність наповнювача і структурування під час термічної обробки, відіграють другорядну роль і практично не змінюють хід триботехнічних кривих.

Таким чином, модифікування в'язучого ПВС (більш ніж 1 мас.ч.) і ПВХ (понад 30 мас.ч.) призводить до утворення взаємопроникних систем, що дозволяє поліпшити експлуатаційні властивості матеріалів. Кореляція опору фрикційно-контактної втоми і величини M_c підтверджує домінуючий вплив топологічної структури на основні характеристики реактопластів.

Для встановлення у повному об'ємі залежності інтенсивності зношування і мікротвердості від складу композита був застосований метод

центрального ротатбельного планування другого порядку. Функцію відгуку апроксимували поліномами Шеффе, що дає змогу побудувати математичну модель для багатокомпонентних систем при мінімальній кількості експериментів. Параметрами оптимізації були вибрані інтенсивність лінійного зношування (I) і мікротвердість (H) матеріалу, а факторами - вміст у в'язучому ПВС (X_1), ПВХ (X_2), температура T_0 (X_3) і тривалість термообробки (X_4) матеріалу. В результаті статистичної обробки на ЕОМ отримали рівняння регресії, які відображають вплив концентрації інгредієнтів і температурно-часових режимів на інтенсивність зношування (I) і мікротвердість (H) матеріалу:

а) з вмістом ПВС:

$$I \cdot 10^8 = 2,477 - 1,48X_1 + 2,757X_3 + 0,274X_4 + 0,328X_1X_3 + 1,299X_1X_4 + 1,761X_3X_4 + 2,796X_1 + 2,614X_3 + 0,056X_4; \quad (1)$$

$$H = 230,9 - 9,937X_1 + 5,116X_3 - 9,314X_4 - 10,27X_1X_3 - 8,917X_1X_4 + 0,85X_3X_4 - 13,72X_1 + 8,846X_3 + 9,36X_4; \quad (2)$$

в) з вмістом ПВХ:

$$I \cdot 10^8 = 2,797 - 0,438X_2 + 0,249X_3 + 0,826X_4 + 0,842X_2X_4 - 0,267X_2 + 2,506X_3 + 0,473X_4; \quad (3)$$

$$H = 125,8 - 32,42X_2 + 1,731X_3 + 2,842X_4 - 3,25X_2X_3 + 1,08X_2X_4 - 1,03X_3X_4 + 4,171X_2 - 10,34X_3 + 1,325X_4; \quad (4)$$

Порівняння експериментальних і табличних значень критеріїв Фішера показує, що рівняння (1), (2) і (4) представляють адекватні математичні моделі, а рівняння (3) близьке до адекватної моделі відповідних властивостей досліджуваних. Отримані математичні моделі дозволяють прогнозувати властивості композитів залежно від складу інгредієнтів і технології формування покриттів. Оптимізовано концентрації модифікаторів, які забезпечують покриттям високі міцнісні і триботехнічні характеристики.

Таким чином, результати досліджень дають підставу запропонувати методи підвищення триботехнічних характеристик базових в'язучих для створення композитів антифрикційного призначення.

Четвертий розділ присвячений вивченню поведінки матеріалів, що містять поліетилен і поліамід, в умовах фрикційної взаємодії при значних навантаженнях, а також дослідженню зміцнюючої дії мінеральних наповнювачів з високою поверхневою енергією. Вибір органічних наповнювачів обумовлений різними температурами плавлення, енергією когезії, полярністю і фізико-механічними властивостями. Мінеральними наповнювачами були оксиди металів. Для порівняння використовували політетрафторетилен з низькою поверхневою енергією (в 20-30 разів меншою, ніж у оксидів).

Встановлено, що висока зносостійкість притаманна композитам, з дисперсним поліетиленом, попередньо сумішеним з мастилом. Збільшення навантажувальної здатності цих матеріалів пояснюють утворенням на поверхнях тертя ефективних захисних плівок переносу, які чинять слабкий опір зсувові.

Поліпшення триботехнічних характеристик порівняно з композитом, що містить поліамід, досягається завдяки низькій енергії когезії поліетиленових плівок переносу. Додаткове зменшення енергії когезії спричиняє пластифікація полімеру мінеральним мастилом. Плівки з матеріалу наповнювача з дещо нижчою температурою плавлення, ніж матриці, виникають на поверхнях тертя при незначних навантаженнях. Константовано, що ефект фрикційного розділу компонентів у суміші реалізується вже при невеликих навантаженнях ($P=0,1-0,25$ МПа), а температура в зоні тертя при навантаженнях не перевищує температури плавлення поліетилену. Прояв ефекту фрикційного розділу компонентів у суміші при низьких навантаженнях слід пов'язувати зі збільшенням рухливості макромолекул наповнювача, зумовленим, в першу чергу, пластифікацією поліетилену мінеральним мастилом.

Досліджено поведінку композита, який містить поліетилен з мастилом при фрикційній взаємодії в діапазоні навантажень $P=0,25-30$ МПа та залежність коефіцієнта тертя від тривалості нерухомого контакту під навантаженням, тобто опірність "стоп-ефекту" ("стоп-ефект" - це тимчасове збільшення коефіцієнта тертя внаслідок тривалої витримки пари тертя під навантаженням після поновлення руху). Встановлено, що з поновленням ковзання при витримці до $10,8-14,4 \cdot 10^3$ с і навантаженнях до $P=15,5$ МПа коефіцієнт тертя покриття із досліджуваного матеріалу досить несуттєво й на короткий час підвищується (на 10-15%). При витримці пари тертя під навантаженням понад $P=15,5$ МПа на протязі $3,6 \cdot 10^4$ с він стрибкоподібно зростає у 2-2,5 рази порівняно з вихідним значенням. Причому коефіцієнт тертя не відновлюється до попередньо-

го рівня, а залишається високим, що призводить до швидкого виходу з ладу пари тертя.

В інтервалі температур 363-383 К "стоп-ефект" не проявляється, а коефіцієнт тертя мінімальний. Армування матеріалу дрібнонарубаним волокном підвищує стійкість проти "стоп-ефекту" до $P=35$ МПа, а витримку під навантаженням доводить до $7 \cdot 10^4$ с (табл.1). Щоб підвищити навантажувальну здатність матеріалу й поліпшити його фізико-механічні властивості, у в'язуче вводили високомодульні мінеральні добавки. Показано, що інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя з підвищенням ступеня наповнення проходять через мінімум при 3-10 мас.ч. оксиду алюмінію і 15-20 мас.ч. цинку. Другий мінімум на кривих триботехнічних характеристик виявлено при наповненні 80-120 мас.ч. оксиду алюмінію і 75-85 мас.ч. оксиду цинку. Саме в області цих концентрацій збільшуються твердість і модуль пружності, що зумовлено впливом деформаційно-міцнісних і антифрикційних характеристик наповнювачів на аналогічні параметри композитів.

Поліпшенню фізико-механічних властивостей матеріалу сприяє також перехід в'язучого в стан граничних прошарків. При невеликому наповненні (5-15 мас.ч. оксидів на 100 мас.ч. в'язучого) зростають зносостійкість і фізико-механічні характеристики матеріалу, що спричиняє зміна ступеня зшивання в'язучого. Поверхня наповнювача утворює з в'язучим фізичні вузли, які зберігаються нижче температури склування полімерної матриці. Зміщення екстремуму триботехнічних і фізико-механічних характеристик при наповненні оксидом алюмінію порівняно з оксидом цинку в область нижчих ступенів наповнення (5-10 мас.ч. на 100 мас.ч. в'язучого) пояснюється різницею у величині поверхневої енергії домішок (в 1,5 разу). Оксид алюмінію має більшу поверхневу енергію, ніж оксид цинку. При введенні наповнювача (ПТФЕ) з низькою поверхневою енергією ($18,5 \cdot 10^{-3}$ Дж/м²) екстремальних змін як триботехнічних, так і фізико-механічних властивостей не спостерігається. За даними ДТА площі екзотермічних піків зменшуються зі збільшенням кількості наповнювача у в'язучому під час затвердіння. Цей факт свідчить про відсутність хімічної взаємодії між матрицею і поверхнею наповнювача. Зниження реакційної здатності в'язучого слід пов'язувати із сповільненням рухливості макромолекул поблизу твердої поверхні наповнювачів. У таких шарах молекулярна рухливість нижча, ніж в об'ємі в'язучого, що зумовлює зменшення площі екзотермічних піків ДТА. Дослідження модуля пружності при температурах вище температури склування полімерної матриці виявило його монотонну зроста-

ючу залежність від ступеня наповнення оксидами алюмінію і цинку. Методом ЕПР-спектроскопії зафіксовано різке зниження рухливості введеного в матеріал парамагнітного зонда при наповненні композита оксидами металів вже при 1-2 мас.ч. на 100 мас.ч. в'язучого, в області температур нижче температури склування полімерної матриці, при температурі ж вище температури склування рухливість практично не змінюється.

Таблиця 1. Допустимі режими роботи покриттів при швидкості ковзання $V=0,18$ м/с

Матеріал	Допустима температура експлуатації Q (К)	Допустиме питоме навантаження P (МПа)	Інтенсивність зношування при Q та P	Коефіцієнт тертя при Q та P
Композит, що містить дисперсний поліетилен з мастилом	390	15,5	$3,5 \cdot 10^{-7}$	0,12
Композит, що містить дисперсний поліетилен з мастилом та волокнистий наповнювач	395	35	$2,1 \cdot 10^{-7}$	0,11

Таким чином, дослідженнями фізико-механічних характеристик з використанням методів ДТА і ЕПР-спектроскопії встановлено, що мінеральні домішки з високою поверхневою енергією (оксидів алюмінію і цинку) інтенсифікують зшивання, утворюючи додаткові вузли між макромолекулами в'язучого та активними центрами на поверхні наповнювача. Це суттєво підвищує зносостійкість і фізико-механічні характеристики. Результати досліджень дозволили намітити шляхи поліпшення фрикційних властивостей розроблених матеріалів, які полягають у регулюванні параметрів структури просторово-сіткового полімеру за рахунок керування ступенем фізичного зшивання в матеріалі.

На підставі експериментальних даних можна стверджувати, що введення наповнювачів з більшою поверхневою енергією покращує три-

ботехнічні та фізико-механічні характеристики матеріалів. Запропоновано метод активації наповнювачів диспергуванням після охолодження наповнювача з наступним нагрівом для створення активного стану. В процесі обробки середній розмір частинок зменшується у 1,5-3 рази. Час активного збереження наповнювача визначають за формулою

$$t \leq 10^{-15} \cdot e^{\frac{1.2 \cdot 10^4}{T}}, \quad (5)$$

де T - температура, при якій зберігають наповнювач.

Підвищення поверхневої активності пояснюють так. Зміна потенційної енергії пов'язана зі зміною координати атома x :

$$\Delta U(x) = \frac{2}{Z} \left(\frac{d^2 U}{dx^2} \right)_0 x^2 + \frac{1}{3Z} \left(\frac{d^3 U}{dx^3} \right)_0 x^3 = \beta_0 \frac{x^2}{2} - \frac{bx^3}{3}. \quad (6)$$

Тут введено позначення

$$\beta_0 = \frac{4}{Z} \left(\frac{d^2 U}{dx^2} \right)_0, \quad b = -\frac{1}{Z} \left(\frac{d^3 U}{dx^3} \right)_0,$$

де Z - число найближчих сусідів атома (координатне число).

Причому коефіцієнт теплового розширення

$$\alpha = \frac{bk}{\beta_0^2} \times \frac{1}{r_0}, \quad (7)$$

де k - постійна Больцмана; r_0 - віддаль між атомами, що знаходяться у рівновазі.

Приходимо до висновку, що у першому наближенні коефіцієнт теплового розширення твердих тіл обернено-пропорційний числу сусідніх атомів Z . Отже коефіцієнт теплового розширення поверхневих шарів твердих тіл повинен бути у 1,5-3 рази більший, ніж основного об'єму твердого тіла. При зміні температури поверхневий шар твердого тіла буде знаходитись у напруженому стані, що значно підвищить поверхневу енергію твердого тіла. Експериментально встановлено, що час перебування наповнювача у активному стані можна розрахувати за формулою (5).

В логарифмічних координатах

$$\ln t \leq \frac{1200}{T} - 34,5. \quad (8)$$

Частота переходів f_m кожного атома з положення рівноваги в найближче міжвузля кристалічної ґратки

$$f_m = Z \nu e^{-\frac{E_0}{kT}}, \quad (9)$$

де Z - число найближчих міжвузлів (4 - для об'ємноцентрованої, 12 - для гранецентрованої решіток); ν - енштейнівська частота коливань атомів ($\nu=10^{13}$ Гц); E_0 - енергія активації дифузії (міграції) атомів з вихідного положення в сусіднє. Для твердих тіл $E_0 \approx 1$ еВ.

Таким чином, час, на протязі якого кожний атом здійснює стрибок,

$$t_0 = 1/f_m. \quad (10)$$

Якщо прийняти, що для зниження напруження достатньо навіть одного стрибка атома в положення з меншою енергією, то за час t_0 напружений стан повністю зникне. При зниженні напруженого стану на 10% за час

$$t \leq 0,1t_0 \quad (11)$$

додаткова енергія не встигне зменшитись більше як на 10%, тобто

$$t \leq 0,1t_0 \leq e^{kt}. \quad (12)$$

Енергія активації металів та їх сполук змінюється в діапазоні 20-60 ккал/моль. Приймаючи за нижню межу $E_0=20$ ккал/моль, отримуємо

$$t \leq \frac{10^{-14}}{Z} \cdot e^{\frac{10^4}{T}}, \quad (13)$$

що близько до значення часу (5), визначеного експериментально.

Згідно з наведеним вище "безпечний" час зберігання наповнювача при температурі 300 К складає не більше 2,52 кс, при температурі 290 К - 9,36 кс, а при 280 К - 41,04 кс з моменту розігріву. У випадку використання епоксидної та фенолформальдегідної смол даний метод дозволяє підвищити механічну міцність на 10-15%, термічну стійкість - на 15-40% порівняно з відомими способами обробки наповнювачів.

На наступних етапах досліджували триботехнічні характеристики пари "полімерний композит - аморфне металеве плазмове покриття". Режими напилення плазмового покриття вибирали так, щоб забезпечити аморфну структуру та пористість 15%, які в подальшому заповняли мастилом. Встановлено, що при заповненні пор мастилом МС-20 на 30% коефіцієнт тертя $f=0,1-0,12$, а температура в зоні тертя становить 333-336 К при інтенсивності зношування $I=1,4...1,6 \cdot 10^{-8}$. Заповнення пор на 50 та 95% мастилом зменшує коефіцієнт тертя у 1,6 та 2 рази при цьому $I=1,6...1,8 \cdot 10^{-10}$ та $I=7...9 \cdot 10^{-12}$ відповідно. Введення у в'язуче оксидів додатково підвищує триботехнічні характеристики пари тертя. Коефіцієнт тертя знижується на 20-25%, інтенсивність зношування - до $I=2,5 \cdot 10^{-13}$, а верхня температурна межа стабільної роботи пари зростає до 433 К.

Таким чином, покращення триботехнічних характеристик досягали за рахунок армуючої дії дисперсій оксидів металів. Застосування наповнювачів з високою поверхневою енергією дозволяє більш повно реалізувати зміцнюючу дію добавок, особливо при незначних наповненнях. Це дає можливість створювати машинобудівні матеріали антифрикційного призначення з високими зносостійкістю та фізико-механічними характеристиками. Запропоновані матеріали достатньо стійкі до прояву "стоп-ефекту" в умовах реверсивного руху однієї з поверхонь тертя. Використання пористих аморфних покриттів з металічних сплавів і заповнення пор мастилом для роботи в парі з реактопластом є досить перспективний напрямок збільшення ресурсу роботи металополімерних пар тертя.

П'ятий розділ присвячений експериментальному дослідженню закономірностей зміни внутрішніх напружень і адгезійної міцності покриттів залежно від режимів формування, природи наповнювача та умов експлуатації. Показано, що адгезійна міцність (σ_a) і внутрішні напруження ($\sigma_{вн}$) в покриттях при різних температурах термічної обробки (T_o) мають екстремальний характер. Максимум внутрішніх напружень спостерігається при більших температурах термічної обробки ($T_o=470-480$ K) на відміну від адгезійної міцності ($T_o=390-430$ K).

Слід відзначити, що σ_a вище у епоксифуранового, ніж у епоксидного в'язучого, тобто адгезійна міцність епоксифуранових покриттів зміщується в область більш високих температур обробки порівняно з епоксидними. Це пов'язано з формуванням дещо густішої полімерної сітки в матриці при $T_o=430$ K. При температурах обробки $T_o>430$ K перевалюючий вплив на σ_a мають значні внутрішні напруження в покритті й дефекти в матеріалі, спричинені термічною деструкцією в'язучого.

Руйнующе напруження при випробуваннях покриттів на відрив монотонно зростає зі збільшенням ступеня наповнення (до 10 мас.ч. ПВС і до 100 мас.ч. ПВХ на 100 мас.ч. в'язучого) із $\sigma_a=15$ МПа до $\sigma_a=22,5$ МПа. При наповненні ПВС це пояснюється підвищенням ефективної густини структурної сітки в результаті додаткової взаємодії в'язучого і наповнювача внаслідок утворення взаємопроникних полімерних сіток.

Модифікація покриттів ПВХ приводить до збільшення M_c і зниження модуля пружності матеріалу. Це обумовлено з поганим суміщенням ПВХ і в'язучого, в результаті чого утворюється суміш полімерів з чіткими межами поділу фаз. При руйнуванні матеріалу менш жорстка фаза ПВХ запобігає поширенню тріщин у більш жорсткій матриці,

ІНБ ім. В. Степанька
АН України

збільшуючи таким чином σ_a . Встановлено, що максимум адгезійної міцності вихідного і наповненого ПВХ в'яжучого припадає на температури $T_0=390-430$ К. Збільшення σ_a матеріалу при модифікуванні ПВХ в області цих температур пояснюється утворенням власної безперервної фази з наповнювача. Внутрішні напруження при введенні наповнювачів монотонно знижуються.

Підвищення термічної стабільності модифікованого епоксидного в'яжучого порівнянно з ненаповненим матеріалом зумовлено тим, що продукти термічної деструкції термопластичних наповнювачів відіграють роль акцепторів вільних радикалів для епоксидних смол. Це підтверджують дослідження методом ДТА. Площа піків кривих ДТА при деструкції матеріалу, наповненого ПВС і ПВХ, менша від площі піків чистого в'яжучого.

Відомо, що вплив концентрації дисперсних наповнювачів з оксидів металів на адгезійну міцність композитів неоднозначна. Тому важливо оцінити оксидонаповнені системи з точки зору адгезійної міцності. На прикладі оксидів алюмінію та цинку встановлено (рис.3), що вплив концентрації наповнювачів на адгезійну міцність системи "покриття-мета-

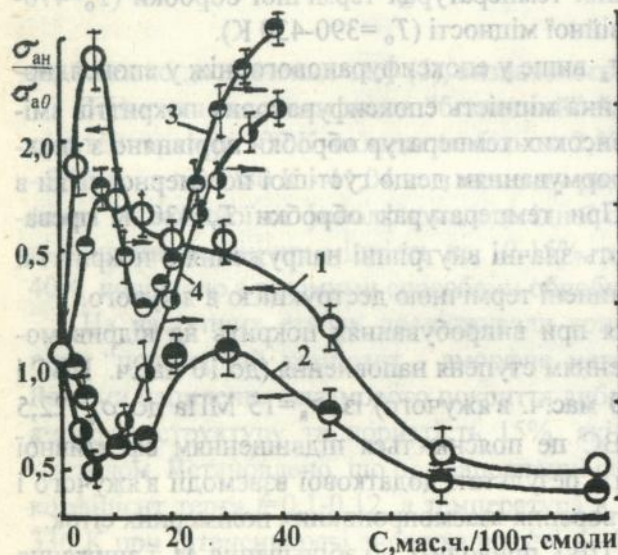


Рис.3. Залежність відносною зміни адгезійної міцності з'єднань $\sigma_{ан} / \sigma_{а0}$ (1,2) "епоксифуранове покриття-алюміній" та кількості власних парамагнітних центрів N_n/N_0 (3,4) у затвердлому в'яжучому від концентрації оксидів алюмінію (1,3) та цинку (2,4). ($\sigma_{а0}$, $\sigma_{ан}$ - адгезійна міцність ненаповненого та наповненого оксидами металів композитів).

леий субстрат" відносно адгезійної міцності ненаповненого матеріалу має немонотонний характер. Невеликі добавки оксиду алюмінію істотно підвищують адгезійну міцність з'єднань, а оксиду цинку дещо її знижують. При наповненні більше 70 мас. ч. на 100 мас. ч. в'яжучого

адгезійна міцність з'єднань стабілізується. Пояснити характер зміни адгезійної міцності зміною фізико-механічних властивостей композитних матеріалів не можливо. Особливо важко інтерпретувати закономірності, що спостерігаються при концентраціях не менше 30 мас.ч. на 100 мас.ч. в'язучого. Встановлено, що рухливість макромолекул в КМ, визначена методом ЕПР-спектроскопії за допомогою введеного в матеріал стабільного нітросильного радикала-зонда, різко знижується при незначному наповненні системи.

Під час тверднення у в'язучому внаслідок розкриття епоксидних та фуранових груп створюються вільні радикали - парамагнітні центри. При великих наповненнях взаємодія реакційно-спроможних груп при формуванні покриттів ускладнюється через блокування ділянок молекул активними центрами, що знаходяться на поверхнях наповнювача, так і субстрату. В даних системах є багато вільних радикалів, час життя яких складає декілька років. Тому досліджували вплив наповнювачів на кількість власних парамагнітних центрів N_n в матеріалі в'язучого після відшарування фольгового субстрату (кількість парамагнітних центрів у вихідному в'язучому - N_0). Результати вимірювання у відносних величинах свідчать про суттєво різний модифікуючий вплив оксидів алюмінію та цинку в діапазоні їх малих концентрацій у КМ (рис.3). Зміцнююча дія оксиду алюмінію з ростом чисельності вільних парамагнітних центрів у затвердлому в'язучому і послаблююча оксиду цинку із зменшенням активних центрів практично співпадають. Додаткову інформацію про характер взаємодії в'язучого та наповнювача отримували використовуючи метод ДТА. Зміна екзотермічного ефекту твердіння в ході динамічного нагріву зразків з однаковим вмістом в'язучого свідчить про монотонне зменшення ступеня перетворення модифікованого олігомера в полімер включно до 25-50 мас.ч. наповнювача на 100 мас.ч. в'язучого. Аналізуючи отримані результати, припускали, що для високонаповнених систем характерні незавершеність процесу тверднення та можливий надлишок затверджувача. Хімічна взаємодія в'язучого і наповнювача не відбувається. Реакційна спроможність в'язучого обмежується створенням фізичних вузлів його молекул з поверхнею наповнювача. Незважаючи на суттєве зниження σ_a високонаповнених оксидом алюмінію матеріалів доцільним є формування двошарових покриттів. Як адгезійно-активний шар використовують матеріал, що має 5 мас.ч. оксиду алюмінію. Для тонких покриттів (товщиною до 200 мкм) такий підшар краще наносити з розчину. Для покриття великої товщини застосовують матеріал без розчинника, після

чого наносять шар із високонаповнених матеріалів. Ефект взаємодії шарів при їх загальній товщині 15-20 мкм реалізується повною мірою. Найбільш ймовірними причинами спостережуваних закономірностей є різна адсорбційна спроможність інгредієнтів в'язучого оксидами металів. Це призводить до неоднакової взаємодії молекул в'язучого та поверхні наповнювача й характеризує виникнення, у першому наближенні, парамагнітних центрів, що має місце також і у випадку нестационарної термічної дії. Створення виробів з покриттями на основі реактопластів різного функційного призначення, що працюють як в кліматичних умовах, так і при криогенних температурах, передбачає оцінку впливу вказаних факторів на адгезійні властивості полімерних композитів.

Встановлено, що після термоциклювання зразків у діапазоні температур від 80 К до 373 К адгезійна міцність підвищується пропорційно кількості циклів термостатування (табл.2). Це пояснюють тим, що при такій температурі руйнуються найбільш напружені зв'язки в матеріалі покриття, в тому числі й у приповерхневому шарі на лінії поділу "композит-основа", зі створенням реакційно-спроможних радикалів. Рекомбінація радикалів на поверхні металевої основи зміцнює адгезійно ефективні зв'язки з активними центрами (обмінними іонами, вільними електронами, ОН-групами та ін.), що в свою чергу збільшує адгезію композитів до металевої основи.

Методом ІЧ-спектроскопії встановлено, що після термостабілізації зразків протягом 1,8 хс при температурі 293-295 К кількість реакційно-спроможних груп не змінюється, що спостерігали при низькотемпературній обробці. Значить, їх рекомбінація триває менше одного циклу термічної взаємодії, а після термостабілізації матеріал зшивається за рахунок взаємодії радикалів.

Охолодження до 80 К руйнує зв'язки як в об'ємі матеріалу, так і на межі "композит-основа". Наступний нагрів до 373 К викликає рекомбінацію реакційно-спроможних груп і збільшення ступеня зшивання та адгезійної міцності КМ. При температурах ≈ 373 К рухливість макромолекул різко зростає внаслідок руйнування фізичних вузлів, що й підвищує реакційну спроможність радикалів при їх рекомбінації. У цьому випадку створюються передумови превалювання одного з процесів над іншим. Термоциклювання у діапазоні $T=223-293$ К зменшує адгезійну міцність на 20-40% порівняно з міцністю зразка, який не піддавали термоциклюванню. Таке зниження адгезійної міцності спричинене перевагою руйнування адгезійних зв'язків над реком-

бінацією радикалів. Рекомбінація активних груп обмежується слабкою рухливістю макромолекул в'язучого при температурах ≈ 283 К, що подавляє цей процес. Відмічено підвищення адгезійної міцності в діапазоні температур термоцикловання 80-373 К при збільшенні наповнення оксидами металів, а також при армуванні матеріалу вугле- та

Таблиця 2. Відносна адгезійна міцність композитів після термічного циклювання при різних температурах.

№ п/п	Матеріал і конструкція покриття	Відносна адгезійна міцність композитів після термоцикловання (%) у діапазоні температур							
		80...373 К			223...283 К				
		Число циклів			Число циклів				
		5	10	30	5	10	30	100	
1.	Епоксидна смола (100 мас. ч.)+ оксид алюмінію (мас.ч.)								
1.1	10	130	150	155	96	75	75	74	
1.2	20	13	156	159	95	74	70	73	
1.3	30	135	159	157	93	74	71	70	
1.4	60	140	162	180	93	70	64	63	
1.5	100	142	167	169	90	68	65	64	
2.	Епоксидна смола (100 мас. ч.)+ оксид хрому зелений (мас.ч.)								
2.1	5	132	161	161	96	78	76	72	
2.2	10	133	163	162	94	75	69	70	
2.3	15	137	164	161	92	75	65	67	
2.4	30	138	162	162	91	73	64	65	
2.5	60	138	165	164	90	69	64	63	
2.6	100	141	168	167	91	69	63	64	
3.	<i>Багатошарові покриття:</i>								
3.1	<i>Склотканина</i> , просякнута композитом 1.1+вуглетканина, просякнута композитом 2.4+ склотканина, просякнута композитом 2.2.	145	170	168	87	70	60	60	
3.2	<i>Склотканина</i> , просякнута композитом 2.3+вуглетканина, просякнута композитом 1.2+склотканина, просякнута композитом 2.2.	147	170	173	89	71	61	62	

склотканиною. При охолодженні до 80 К утворюються реакційно-спроможні групи з їх наступною рекомбінацією при 373 К та утворенням адгезійних зв'язків. При цих температурах фізичні зв'язки відсутні, отже й не знижують адгезійної міцності за рахунок рекомбінації радикалів.

Результати досліджень дозволили розробити прийоми підвищення адгезійної міцності та зниження внутрішніх напружень багатокомпонентних композитів на основі реактопластів, для виробів з довгомірними поверхнями складного профілю як антифрикційних та електротеплофізичних покриттів вузлів різного функційного призначення.

У шостому розділі наведено результати досліджень впливу фізико-хімічної взаємодії на межі поділу фаз "в'яжуче-наповнювач" на електротехнічні характеристики епоксидних композитів. Зміни електротехнічних параметрів досягали шляхом керування властивостями структури перехідних шарів при введенні наповнювачів з різною поверхневою активністю відносно матриці.

Встановлено, що для епоксидних електроізоляційних матеріалів на основі компонентів з різними електрофізичними властивостями спостерігається немонотонна залежність електротехнічних характеристик від концентрації наповнювачів у матриці.

Досліджено залежності тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ композитів на основі епоксидного в'яжучого, наповненого аеросилом та γ -амінопропілаеросилом, Al_2O_3 дисперсністю 30 і 100 мкм, від температури і частоти електричного поля. Показано, що характер залежностей визначається просторовою будовою полімеру, властивостями матриці та наповнювача, а також надмолекулярною структурою і властивостями матеріалу на лінії поділу "наповнювач - в'яжуче". Встановлено, що зі збільшенням вмісту наповнювача рухливість парамагнітного зонда, введеного у в'яжуче, знижується у 2 рази, тобто сповільнюється рухливість макромолекул внаслідок фізичної та фізико-хімічної взаємодії між матрицею та активними центрами на поверхні наповнювача. Введення неактивних по відношенню до епоксидної матриці (Al_2O_3 з дисперсністю 30 і 100 мкм) добавок знижує $\text{tg}\delta$ порівняно з ненаповненим в'яжучим при підвищених температурах. Такий характер залежності $\text{tg}\delta$ спостерігається до критичної межі наповнення, яка для Al_2O_3 дисперсністю 30 мкм становить 30 мас. ч., а дисперсністю 100 мкм - 60 мас.ч. Використання дрібнодисперсного наповнювача посилює міжфазну взаємодію, зменшуючи $\text{tg}\delta$ на низьких частотах (0,1, 1 кГц). Наповнення епоксидного в'яжучого активними до матриці аеросилом і γ -амі-

нопропілаеросилом сприяє зниженню $\text{tg}\delta$ порівняно з ненаповненим в'язучим при $T=293-393$ К на всіх частотах і будь-яких наповненнях. Встановлено, що зменшення $\text{tg}\delta$ зумовлене обмеженням дипольно-сегментної та дипольно-групової рухливості. Послаблюється інтенсивність смуг поглинання, які відповідають коливанням С-С зв'язку в епоксидному циклі та деформаційним коливанням групи $-\text{CH}_2-\text{OH}$. Використання γ -амінопропілаеросилу активізує цей процес. Така взаємодія наповнювача і матриці призводить до того, що при температурах в області температури склування відсутній головний максимум $\text{tg}\delta$ для композитів із вмістом аеросилу до 4 мас. ч., а для матеріалів на основі γ -амінопропілаеросилу максимум взагалі не спостерігається.

Введення в епоксидне в'язуче Cr_2O_3 , який здатний утворювати з ним фізичні вузли, підвищує $\text{tg}\delta$ на всіх частотах при всіх ступенях наповнення порівняно з ненаповненим матеріалом. Разом з тим при концентрації оксиду 10 мас. ч. $\text{tg}\delta$ практично не змінюється і при $T=313-380$ К він нижчий, ніж у ненаповненому в'язучому. Методом ЕПР-спектроскопії встановлено, що подібна залежність $\text{tg}\delta$ викликана більш інтенсивним фізичним зшиванням та зростанням кількості фізичних вузлів в одиниці об'єму матеріалу. Такий матеріал не схильний до теплового пробою і може використовуватись як ізолятор при підвищених температурах.

Фізична і фізико-хімічна взаємодія, а також вибіркова адсорбція компонентів в'язучого на твердій поверхні наповнювача сприяють утворенню перехідних зон між наповнювачем і в'язучим з покращеними електротехнічними властивості. Це спричиняє екстремальний характер залежності електричної міцності $U_{\text{пр}}$ композитів від вмісту наповнювача і його активності стосовно матриці. Конкуруючий внесок вказаних процесів призводить до утворення максимумів $U_{\text{пр}}$ для композитів на основі Cr_2O_3 при концентраціях 10 і 30 мас. ч.

Наповнювачі, яким властива фізико-хімічна взаємодія з матрицею, збільшують $U_{\text{пр}}$ композита при їх вмісті до 3 мас. ч. Для матеріалів на основі аеросилу і γ -амінопропілаеросилу спостерігаються два максимуми $U_{\text{пр}}$ при 1 і 3 мас.ч. Максимум $U_{\text{пр}}$ матеріалу, що містить аеросил, припадає на концентрацію 3 мас.ч., а із введенням у матрицю γ -амінопропілаеросилу спадає до 1 мас.ч. і становить відповідно 62 і 55 кВ/мм. Електрична міцність невакуумованих композитів аеросилу і γ -амінопропілаеросилу знижується. Наявність повітряних включень ніве-

лює ефекти описаних механізмів підвищення $U_{\text{пр}}$ (рис.4). Причому у разі γ -амінопропілаеросилу це зниження більш суттєве, що пояснюють інтенсивнішою адсорбцією повітря його модифікованою по верхню. Вакуумування компози та перед отвердінням до підвищення $U_{\text{пр}}$, особ-

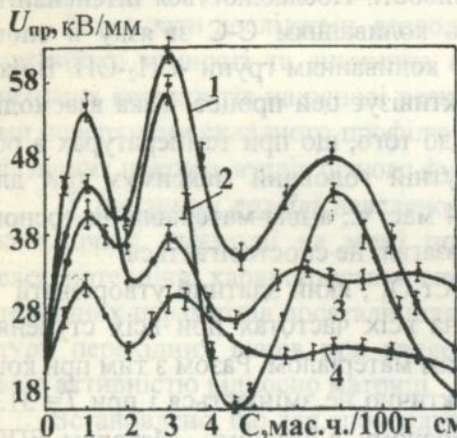


Рис. 4. Залежність електричної міцності композитів від концентрації аеросилу (1, 2) і γ -амінопропілаеросилу (3, 4) вакуумованого (1, 3) і не вакуумованого (2, 4) перед затвердненням матеріалів.

ливо матеріалів, наповнених γ -амінопропілаеросилом. Необхідно відмітити, що при концентрації наповнювача більше 3 мас.ч. переважає зниження $U_{\text{пр}}$, зумовлене наявністю газових включень, видалення яких з модифікованої поверхні γ -амінопропілаеросилу ускладнено навіть при вакуумуванні. Це підтверджують і дані оптичної мікроскопії. Видалення газових включень з поверхні наповнювачів досягали обробкою ацетоном, що розчиняє адсорбований газ. У цьому випадку спостерігається підвищення $U_{\text{пр}}$ композитів у 2-2,5 разу при всіх ступенях наповнення.

Отже, при концентраціях до 3 мас. ч. досліджені аеросили виступають як модифікатори, що змінюють структуру в'язучого і сприяють підвищенню $U_{\text{пр}}$ композита. Методом ЕПР-спектроскопії виявлено кореляцію між кількістю парамагнітних центрів і залежністю $U_{\text{пр}}$ від концентрації наповнювачів у матеріалі. Такий взаємозв'язок дозволяє прогнозувати електричну міцність композитів.

Напруга пробою композитів з використаними наповнювачами залежить від їх активності що до полімерної матриці. Вплив дисперсності на електротехнічні властивості оцінювали на прикладі матеріалів на основі Al_2O_3 . Встановлено, що зміна дисперсності Al_2O_3 з 100 до 30 мкм (рис.5), майже не впливає на характер кривих і призводить до зміщення координат екстремумів по концентраційній осі. Вплив структури на електротехнічні показники композитів оцінювали також зміною п'єзоелектричної сталої, вважаючи, що збільшення зшивання матеріалу підвищує його електричну міцність. Макромолекула епоксидної

матриці являє собою диполь. Лазерна ударна дія на зразок викликає переорієнтацію диполів і п'єзоелектричний сигнал. Введення наповнювачів різної модифікуючої дії на епоксидну матрицю змінює рухливість макромолекул і п'єзоэффект. Інтенсивність п'єзоэффекту в композиті виз-

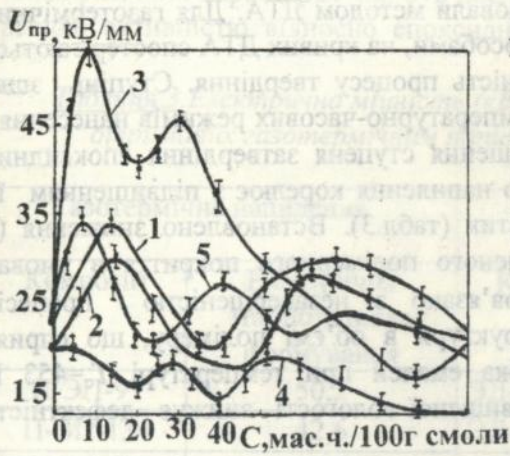


Рис.5. Залежність електричної міцності від концентрації оксидів алюмінію (1,2) і хрому (3,4) вакуумованого (1,3) і не вакуумованого (2,4) матеріалів перед затвердненням (1, 2 - дисперсність 100 мкм, 3,4 - дисперсність до 10 мкм, 5 - дисперсність 30 мкм).

начали параметром q , який є комплексним фактором і враховує зміну. Встановлено, що залежності $U_{пр}$ і q від вмісту

наповнювача в матриці корелюють між собою.

Таким чином, збільшення $U_{пр}$ досягали, вводючи наповнювач у полімерну матрицю в концентраціях, які забезпечують мінімальну кількість парамагнітних центрів і мінімальну величину q . Максимальні значення $U_{пр}$ спостерігаються при тих же концентраційних координатах, що й мінімуми на кривих залежностей кількості парамагнітних центрів $N_{п}$. Зменшення $N_{п}$ із збільшенням кількості ударів свідчить про здатність матеріалу в'язучого структуруватися.

Виявлено ефект структурування в'язучого композита під дією електричного поля, нижчого за пробивне. Витримка зразків під напругою $0,6 U_{пр}$ підвищує її межу, що покращує експлуатаційні властивості матеріалу. Якщо розглянутий механізм зміни електричної міцності композита, пов'язаний зі структуруючим впливом наповнювачів, справедливий, то введення невеликої кількості навіть електропровідного наповнювача, але сильної модифікуючої дії відносно епоксидного в'язучого спричинить $U_{пр}$ епоксидної матриці. Порошок NiAl марки ПТ-НА-01 (ТУ 48-12-06-156-82) у концентраціях до 10 мас.ч. збільшує $U_{пр}$ епоксидного композита в 2,5-3 рази порівняно з $U_{пр}$ ненаповненої епоксидної матриці. Слід відзначити, що введення дисперсних матеріалів з високими електроізоляційними показниками і слабкою модифікую-

чою дією відносно матриці, наприклад слюди, призводить до зниження $U_{пр}$ полімерної матриці.

Вивчено вплив ступеня зшивання матеріалів, що наносились методом газотермічного напилення, на їх електричну міцність. Ступінь зшивання матеріалу покриття оцінювали методом ДТА. Для газотермічних покриттів, нанесених різними способами, на кривих ДТА спостерігаються піки, що вказує на незавершеність процесу твердіння. Ступінь зшивання покриттів залежить від температурно-часових режимів нанесення і становить 12,6% - 84%. Збільшення ступеня затвердіння епоксидних покриттів під час газотермічного напилення корелює з підвищенням їх електроізоляційних характеристик (табл.3). Встановлено зниження (в 1,1-5,5 разу) $U_{пр}$ плазмонанішеного полімерного покриття в умовах підвищеної вологості. Це пов'язано з незавершеністю процесів полімеризації і дефектами структури в об'ємі полімеру, що сприяє виникненню пор. Термообробка емалей при температурі $T_0=453$ К протягом 2 годин після дії підвищеної вологості знижує дефектність структури і підвищує $U_{пр}$.

Газотермічне напилення є перспективною технологією отримання матеріалів і покриттів на основі епоксидних в'язучих із спеціальними електротехнічними властивостями. Електрична міцність таких матеріалів залежить від ступеня зшивання полімерної матриці. Константовано, що $U_{пр}$ композитів на основі ЕД-20, які піддавали впливу навколишнього середовища (атмосферні опади, перепад температур тощо) і випробуваних через 380 діб, практично не змінюється і лежить в межах похибки експерименту. Електрична міцність матеріалів, наповнених Al_2O_3 і зістарених під дією γ -випромінювання в середовищі води, знижується на 15-25%. Значення $U_{пр}$ опроміненого матеріалу корелює із значеннями $U_{пр}$ неопроміненого. Тобто, характер механізмів, що сприяють підвищенню електричної міцності відносно полімерної матриці не змінюється при опроміненні. Це дозволить забезпечити стабільну роботу матеріалу в реальних експлуатаційних умовах протягом тривалого часу. Наявність в об'ємі композита навіть невеликої кількості епоксидних груп, що не прореагували, перешкоджає міграції електричних зарядів. У цьому випадку епоксидні групи, які не прореагували, а також фізичні вузли, що руйнуються під дією електричного поля, виконують роль "вловлювачів" носіїв зарядів. Це уповільнює процес електростаріння матеріалу і підвищує $U_{пр}$. Розроблені матеріали характеризуються високими значеннями $U_{пр}$ (35 - 62 кВ/мм), технологічністю при переробці і

формуванні із них виробів. Слід підкреслити, що обробка наповнювача ацетоном додатково підвищує $U_{пр}$ у 2-2,5 рази.

Оскільки експлуатаційна здатність КМ великою мірою залежить від теплофізичних характеристик, був досліджений вплив оксидів металів з різною активністю відносно епоксидної матриці на теплопровідність

Таблиця 3. Електрична міцність (кВ/мм) епоксидних композитів, отриманих газотермічним напиленням і вільною заливкою

Газотермічне напилення		Вільна заливка	
Композит	Електрична міцність після формування	Композит*	Електрична міцність після формування
П-ЭП-91	50,2	ЭД-20+15Al ₂ O ₃	33,9
П-ЭП-134	42,6	ЭД-20+10Cr ₂ O ₃	53,1
П-ЭП-185	30,0	ЭД-20+1 А	60,0
П-ЭП-177	64,7	ЭД-20+1 А _м	62,5

* Вміст наповнювача вказаний в мас. ч. на 100 мас. ч. в'яжучого.

матеріалів. Показано, що наповнювачі, яким властива хімічна і хемосорбційна взаємодія з епоксидною матрицею, збільшують теплопровідність λ при малих наповненнях (композити на основі аеросилу і γ -амінопропілаеросилу відповідно 1 і 3 мас.ч.). Це пов'язано з хімічною взаємодією на межі поділу фаз, що підтверджують результати ІЧ-спектроскопічного аналізу (поява смуги поглинання, яка характерна для поліорганосилоксанів). Така взаємодія наповнювача і в'яжучого значно знижує дефектність граничних шарів і тепловий опір межі фаз. Встановлено, що додаткова активація поверхні наповнювача супроводжується збільшенням λ композита. На прикладі γ -амінопропілаеросилу показано, що з посилення міжфазної взаємодії на лінії поділу "матриця-наповнювач" підвищується теплопровідність композита.

З ростом вмісту аеросилу (>3 мас. ч.) спостерігається зниження λ матеріалу головним чином через різке видовження межі поділу і послаблення фізичної взаємодії між наповнювачем і в'яжучим, що, в свою чергу, збільшує дефектність граничного шару. Разом з тим підвищення хімічної активності наповнювача стабілізує значення λ матеріалу при більшому вмісті γ -амінопропілаеросилу в композиті порівняно з менш

активним, стосовно матриці, аеросилом. Введення неактивних наповнювачів у в'язуче (оксидів алюмінію дисперсністю 30 і 100 мкм) збільшує λ композита переважно завдяки теплопровідності самого наповнювача. В таких композитах відсутній хімічний зв'язок між матрицею і наповнювачем, а фізичний виражений досить слабо. При цьому менш дисперсний наповнювач збільшує λ матеріалу. Це пов'язано з видовженням лінії поділу фаз і покращенням питомого механічного контакту поверхні наповнювача з матрицею. Встановлено, що з підвищенням температури цей контакт порушується й супроводжується різким зменшенням λ композита. Порушення фізико-механічної взаємодії фаз спричинене великою різницею у коефіцієнтах температурного розширення матриці і наповнювача. Це сприяє зростанню розтягуючих напружень і, як наслідок, збільшенню теплового опору межі поділу, що призводить до зменшення теплопровідності матеріалу та її циклічної зміни.

Введення в матрицю наповнювачів, здатних створювати фізичні вузли, зумовлює немонотонну залежність теплопровідності температури. Для композита, наповненого Cr_2O_3 , характерний прояв механізмів, властивих як хімічно активним (γ -амінопропілаеросилу, аеросилу), так і неактивним (Al_2O_3) наповнювачам. Для цього типу наповнювачів теплопровідність визначається конкуренцією описаних механізмів її зміни. Утворення фізичних вузлів між матрицею і активними центрами на поверхні частинок наповнювача збільшує λ композита при низьких температурах (173 - 248 К) завдяки зміцненню зв'язків на межі фаз. При $T=248-273$ К, $T=298-328$ К вона знижується через зростання дефектності граничного шару і термічного опору. В той же час збільшення вмісту наповнювача підвищує теплопровідність матриці в основному за рахунок наповнювача.

Слід відзначити, що циклічність зміни теплопровідності зі зміною температури для композита, наповненого Cr_2O_3 , менш чітка ніж для композита, що містить Al_2O_3 . Встановлено, що кінетика теплопереносу в гетерогенній системі композита залежить від виду і ступеня взаємодії компонентів на межі поділу "наповнювач-в'язуче".

Сьомий розділ присвячений розробці на базі виконаних досліджень машинобудівних матеріалів антифрикційного призначення для вузлів тертя з реверсивним рухом однієї з поверхонь. Запропоновано вузли тертя з композитів на основі реактопластів для експлуатації в різних температурних і навантажувально-швидкісних режимах.

При створенні зносостійких матеріалів, крім антифрикційних домішок (графіт, дисульфід молібдену, мінеральне мастило, політетрафторетилен), використовували оксиди металів, каолін, диметиламоній, бензойноокислий натрійкобальтонітрат. Введення волокнистого наповнювача, попередньо обробленого полівініловим спиртом, дозволило збільшити максимальні навантаження прояву “стоп-ефекту” у 1,8-2 рази (а.с.№1419127). Стрибків коефіцієнта тертя у вузлі з реверсивним характером руху при навантаженнях 5-35 МПа і температурах 290-410 К не спостерігали.

Показано (а.с.№№ 1603724, 1515660, 1314645, 173966, 1584426, 1479479), що розроблені композити порівняно з матеріалами аналогічного призначення (патент США № 1411851 і патент Японії № 48-9847) мають вищі зносостійкість (у 2-2,5 разу), адгезійну міцність (на 30-40%) та міцнісні показники на (10-15%). Встановлено, що в результаті трибо-хімічної взаємодії сухих мастил з диметиламонієм бензойноокислим і натрійкобальтонітратом в присутності оксиду магнію і каоліну на спряжених поверхнях формуються адгезійно-спроможні плівки переносу, які захищають від корозійного зношування у присутності вологи як антифрикційне покриття, так і контртіло (ТУ-88 БРСР 120-86).

Сконструйовано пристрої для нанесення покриттів (а.с.№№1235552, 1353621, 1426815, 1519901, 1622146) з композитів на робочі поверхні вузлів складного профілю. Порівняно з аналогічними існуючими пристроями запропоновані дозволяють скоротити час нанесення покриттів, зменшити їх дефектність та покривати гнучкі оболонки. Розроблено конструкції вузлів тертя з полімерними покриттями (а.с.№№ 1046563, 1254330, 1166838, 1574968, 1252588, 1515660, 1314645), в яких передбачені компенсація зазору між поверхнями, що труться, експлуатація при підвищеному вмісті абразивних частинок (а.с. №987244), умови праці антифрикційного покриття у режимі “слідкування” за валом (а.с.№1013677) при швидкості ковзання до 50 м/с, навантаженнях до 4 МПа та змащуванні.

Запропоновано багатошарове покриття електротехнічного та теплофізичного призначення з низькими внутрішніми напруженнями. Застосування даного покриття і способу його отримання дозволяє створити ефективні поверхнево-розподілені нагрівні елементи, що здатні працювати при температурах 223-323 К в умовах обледеніння. Зниження внутрішніх напружень у виробі під час формування покриття і його експлуатації при нестационарному термічному впливі досягали нанесенням компенсаційного шару. Випробування покриття, отриманого цим спосо-

бом і сформованого на секторах оболонки зеркальної системи параболічної антени діаметром 12 м, продемонстрували його ефективність при температурі оточуючого середовища 223 К і товщині льоду 20-30 мм на поверхні відбиття. Повністю розмерзала поверхня через 18 - 20 хвилин після початку обігріву, що становить 60-70% від часу аналогічних систем.

Основні висновки

Досліджено процеси формування структури у матеріалах на основі реактопластів, модифікованих термопластичними полімерами з метою створення триботехнічних композитних матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками триботехнічного, фізико-механічного, електро- та теплофізичного призначення для вузлів тертя і систем електрообігріву оболонкових конструкцій. В ході виконання дисертаційної роботи отримано такі основні результати.

1. Вперше показано (методами частотної релаксометрії, ТМА, ДТА, електронної растрової мікроскопії) взаємозв'язок структурного стану КМ та триботехнічних характеристик при введенні ПВС і ПВХ. Модифікування ПВС реактопласту підвищує зносостійкість у 6-8 разів за рахунок виникнення взаємопроникних полімерних сіток, що збільшує ступінь зшивання матриці. Введення ПВХ покращує триботехнічні властивості завдяки утворенню його неперервної фази в об'ємі в'язучого і плівок переносу на поверхнях тертя.

2. Вперше зафіксовано ефект фрикційного розділу компонентів при навантаженнях 0,1-0,2 МПа та температурах 323-353 К при введенні дисперсного поліетилену попередньо сумішеного з мінеральним мастилом з наступною термічною обробкою. Формування плівок переносу при даних режимах роботи пари тертя підвищує навантажувальну здатність у 1,5-2 рази і суттєво підвищує порогові значення навантаження прояву "стоп-ефекту".

3. Дослідженнями впливу природи і дисперсності мінеральних добавок на фізико-механічні характеристики КМ встановлено (метод ЕПР-спектроскопії, ТМА, ДТА), що введення наповнювачів з високою поверхневою енергією підвищує експлуатаційні показники внаслідок утворення додаткових фізичних вузлів між макромолекулами в'язучого та активними центрами на поверхні наповнювачів.

4. Констатовано, що мінімальне значення інтенсивності зношення і коефіцієнта тертя в області температур обробки 380-450 К пов'язані зі зміною топологічної структури (зменшенням молекулярної

маси відрізка ланцюга між вузлами сітки), а в області температур 490-500 К - з накопиченням продуктів термодеструкції макромолекул.

5. Встановлено підвищення електрофізичних характеристик КМ в результаті фізичної, фізико-хімічної та хемосорбційної взаємодії між наповнювачем та в'язучим ($U_{пр}=50-65$ кВ/мм). Розробленим КМ властиві стабільні значення $U_{пр}$ при експлуатації в умовах кліматичного впливу та деяке зниження (на 15-25%) після γ -опромінення дозою 30 Мрад (середовище - вода). Активація поверхні наповнювачів підвищує електричну міцність у 2-2,5 разу.

6. Показано, що введення аеросилу та γ -амінопропілаеросилу збільшує теплопровідність КМ у 2-3 рази за рахунок фізико-хімічної взаємодії з матрицею, а наповнення оксидами Al_2O_3 та Cr_2O_3 підвищує його теплопровідність у 3-4 рази, в основному завдяки посиленій фізичній взаємодії.

7. Вперше встановлено зростання адгезійних характеристик досліджуваних оксидомістких систем при термічному циклюванні в умовах криогенних температур, яке пов'язане з конкуруючими процесами, що відбуваються в у матриці, а саме:

- руйнуванням адгезійних зв'язків внаслідок виникнення термічних напружень на межі "основа-покриття", що знижує σ_a ;
- рекомбінацією реакційно-спроможних груп (радикалів), що створюються у в'язучому при розширенні температурного діапазону термічного циклювання в об'ємі КМ і на лінії поділу "основа-покриття", що спричиняє збільшення σ_a .

8. На основі проведених досліджень розроблено зносостійкі матеріали для вузлів тертя з підвищеним опором проявові "стоп-ефекту" в умовах реверсу, нові вузли тертя, що дозволяють компенсувати радіальний зазор у парі, пристрої для формування покриттів на складних поверхнях, багат шарові композитні покриття, в тому числі для поверхнево-розподілених нагрівних елементів та здійснено дослідно-промислово перевірку результатів досліджень з економічним ефектом 1 млн.158 тис. крб. у цінах на 1985 рік.

Зміст дисертації викладений в 112 роботах, основними з яких є:

1. *Стухляк П.Д.* Эпоксидные композиты для защитных покрытий. Тернополь: Збруч, 1994. 178 с.

2. *Металлополимерные газотермические покрытия: получение и свойства/ Ю.С.Борисов, Н.С.Свиридова, А.З.Скорород, В.Н.Коржик,*

П.Д.Стухляк, А.П.Мурашов, Н.М.Мытник.-Киев, 1995, - 46 с.- (Препр. / НАН Украины. Ин-т электросварки им. Е.О.Патона; ИЭС-95-1).

3. Стухляк П.Д. Антифрикционные и адгезионные свойства покрытий из реактопластов, модифицированных термопластичными полимерами //Трение и износ.- 1986.- УП, № 1.- С.173-177.

4. Клочихин В.И., Стухляк П.Д., Злотников И.И. О работоспособности некоторых полимерных покрытий в тяжелонагруженном цилиндрическом шарнире//Вестник машиностроения.-1987.- №4.-С.14-16.

5. Электроизоляционные свойства композиционных материалов и покрытий на основе эпоксидных связующих и проблемы их создания / П.Д.Стухляк, Н.М.Мытник, О.К.Шкодзинский, В.Н.Коржик, Ю.С.Борисов, Н.С.Свиридова. - Киев, 1995.- 40 с. - (Препр. / НАН Украины. Ин-т электросварки им. Е.О.Патона; ИЭС-95-2).

6. Стухляк П.Д., Близнац М.М. Износостойкость эпоксифурановых композитов, модифицированных поливиниловым спиртом//Трение и износ. -1987.- УШ.- С.133-136.

7. Стухляк П.Д., Ростанина Н.Б. Определение модулей упругости реактопластов.//Изв. АН БССР. -1987.- №3.- С.39-42.

8. Стухляк П.Д., Коржик В.Н., Шкодзинский О.К. Триботехнические исследования пар эпоксидный композит - плазменное аморфное покрытие//Трение и износ.-1990. -XI, №3.- С.556-559.

9. Стухляк П.Д., Шкодзинский О.К., Мылык И.М. Экспериментально-теоретические аспекты разработки эпоксидных композитов для антифрикционных покрытий//Int. symp. tribological problems in kontakt. INSYCONT.- Krakow, 1990. -Р.196-206.

10. Клочихин В.Н., Стухляк П.Д. Некоторые особенности трения и изнашивания покрытий на основе эпоксидного композита в условиях цилиндрического шарнира//Трение и износ. -1988.- IX, №5.- С.897-902.

11. Близнац М.М., Стухляк П.Д. О влиянии оксидов металлов на износостойкость модифицированных эпоксидных смол// Трение и износ. 1989. -X, №3.- С.473-478.

12. Близнац М.М., Богданович П.Н., Стухляк П.Д. Особенности изнашивания эпоксидных полимеров//Трение и износ.-1988.-X, №3-С.549-553.

13. Гупка Б.В., Стухляк П.Д., Шкодзинский О.К. Машина трения для триботехнических испытаний материалов и смазок//Зав. лаб.-1993.-№2.-С.71-73.

14. Стухляк П.Д., Скороход А.З., Юркевич О.Р. Влияние оксидов металлов на адгезию эпоксифурановых покрытий//Физ.-хим. механика материалов. -1989. -№4.- С.52-55.

15. Стухляк П.Д., Близнец М.М., Сысоев П.В. Износостойкость реактопластов, модифицированных оксидами металлов и ПТФЭ//Проб. трения и изнашивания. -1988.- №33.- С.94-98.

16. Стухляк П.Д. Особенности влияния циклического низкотемпературного воздействия на адгезионную прочность эпоксидных покрытий//Физ.-хим. механика материалов.- 1991.- № 2.- С.67-70

17. А.с. 1788457. МКИ G01 N3/56. Способ исследования процессов трения/ Б.И.Костецкий, Б.В.Гупка, П.Д.Стухляк и др. - Б.И. -1993.- №2.

18. А.с.1761769. МКИ G09 C /04.Способ обработки минеральных наполнителей для полимерных материалов/И.И.Злотников, П.Д.Стухляк, О.К.Шкодзинский и др. - Б.И.- 1992.- №34.

19. А.с.1610398. МКИ G 01 N 3/56. Машина трения/ Б.В.Гупка, П.Д.Стухляк. - Б.И.- 1990.- №44.

20. А.с.1733966. МКИ G 01 N 3/56. Машина трения/ Б.В.Гупка, П.Д.Стухляк. - Б.И.- 1992. -№18.

21. А.с. 1795588 (ДСП). Способ получения покрытия /П.Д.Стухляк, О.К.Шкодзинский, В.Н.Коржик и др. - Б.И.-1990.

22. Близнец М.М., Стухляк П.Д., Сысоев П.В. Оптимизация состава эпоксидных компаундов для антифрикционных покрытий// Изв.АН БССР. -1988.- №2.- С.33-35.

23. Сысоев П.В., Близнец М.М., Стухляк П.Д. Адгезионные свойства наполненных эпоксидных покрытий// Изв.АН БССР. -1986.- №2. -С.118.

24. Сысоев П.В., Близнец М.М., Стухляк П.Д. Влияние добавок полиэтилена на износостойкость модифицированных эпоксидных покрытий// Изв.АН БССР.- 1985.- №2.- С.119

25. А.с.1410927(ДСП). Способ получения антифрикционного материала/ П.Д.Стухляк, М.М.Близнец, П.В.Сысоев. - Б.И.-1986.

26. А.с.1479479. МКИ С 09 D 3/58. Состав для пропитки пористых покрытий/ В.Н.Коржик, П.Д.Стухляк, И.И.Злотников и др.- Б.И.-1989. - №18.

27. А.с.1603724 (ДСП). Композиция для антифрикционного покрытия/ П.Д.Стухляк, И.И.Злотников, И.А.Бондаренко. - Б.И.-1988.

28. А.с.1515660 (ДСП). Полимерная композиция/ М.М.Близнец, П.Д.Стухляк, П.В.Сысоев и др.- Б.И.-1988.

29. А.с.1314645 (ДСП). Антифрикционная композиция/ М.М.Блинец, Н.Ф.Хахалина, П.Д.Стухляк и др. - Б.И.-1987.

30. *Теплофізичні властивості епоксидних композитів*/П.Д.Стухляк, М.М.Миник, І.І.Злотніков.-Тернопіль, 1996.- 46 с.- (Препр./МО України. Тернопільський приладобудівний ін-т ім. І.Пулюя; ТПІ-96-1).

Аннотация

Стухляк П.Д. Создание и исследование композиционных материалов на основе реактопластов для узлов трения и систем электротепло-технического назначения.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.01.- материаловедение в машиностроении (рукопись).

Физико-механический институт НАН Украины, Львов, 1996.

Сформулированы принципы управления структурой реактопластов путем физико-химического модифицирования связующего за счет создания взаимопроникающих систем "полимер-полимер", физического и хемосорбционного взаимодействия в системах "полимер-дисперсный минеральный наполнитель". Установлено повышение стойкости к изнашиванию на три порядка, снижение коэффициента трения до 0,1-0,12 и увеличение нагрузки проявления "стоп-эффекта" до 35 МПа.

Разработаны материалы с повышенными в 2-6 раз электро- и тепло-физическими характеристиками для систем электрообогрева оболочечных конструкций. Предложены новые конструкции узлов трения, созданы устройства для формирования покрытий на сложных длинномерных поверхностях. Разработана методика изучения структуры композитов при помощи лазерного ударного воздействия.

Annotation

P.D. Stuchlyak. The forming and exploring of the compositional materials which are rectoplasm based for unit of friction and electro-heattechnical designated systems.

The dissertation for the Doctorate of technical stadie degree is the specialization 05.02.01 " Materials Knowledge in Mashine-Building" (manuskript).

The Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Science of Ukraine, Lviv, Ukraine, 1996.

The principles of governing a rectoplasm structure by physical-chemical modifications including the forming of an interlocking system "polymer-polymer", the physical and the chemisorbtional interacting in the "polymer dispersional mineral buildup" system were developed. Higher qualities are established to wear out on three levels, there is a decrease of the coefficient of friction to 0.1- 0.12 and there is an increase of exhibition of the "stop-effect" load to 35 MPa.

The materials which have 2-6 times the electro- and heat-physical characteristics for were developed. New construction is unit of friction were presented, devices for forming a cover for advanced longlasting surfaces were developed. A method of studying structural composites with the aid of laser-striking acto was developed.

Ключові слова: композити, в'язуче, ступінь зшивання, інтенсивність зношення, наповнювачі, структура, адгезійна міцність, внутрішні напруження, електрична міцність, теплопровідність, активація.



Підписано до друку 12.05.96.Формат 60×84/16.
Обсяг 2 друк.арк.Зам. 97.Тир.100. Безплатно.
Видавн. компл. ТПІ ім. Івана Пулюя, 282001,
Тернопіль, Руська 56

44726

AB 34.902

02